

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Kauther, Regina; Kramer, Helmut; Schuppener, Bernd; Vorbau, Jana Schiffsanfahrungen an Böschungen von Wasserstrassen - Prognosen des Bremswegs

Deutsche Beiträge. Internationaler Schifffahrtkongress (PIANC)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
PIANC Deutschland

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104872>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kauther, Regina; Kramer, Helmut; Schuppener, Bernd; Vorbau, Jana (2006):
Schiffsanfahrungen an Böschungen von Wasserstrassen - Prognosen des Bremswegs. In:
PIANC Deutschland (Hg.): Deutsche Beiträge. 31. Internationaler Schifffahrtkongreß;
Estoril, Portugal, 14. - 18. Mai 2006. Bonn: PIANC Deutschland. S. 70-79.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Binnenwasserstraßen – Entwurf, Bau, Betrieb und Unterhaltung (1.2)

Schiffsanfahrungen an Böschungen von Wasserstraßen – Prognose des Bremswegs

Dr.-Ing. Bernd Schuppener

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Dipl.-Ing. Regina Kauther

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Helmut Kramer

Ingenieurbüro für das Bauwesen VBI
Kramer & Albrecht, Hamburg

Dipl.-Ing. Jana Vorbau

Ingenieurbüro für das Bauwesen VBI
Kramer & Albrecht, Hamburg

1. Einleitung

Anfahrungen von Schiffen an Böschungen von Wasserstraßen verursachen in der Regel nur geringfügige Schäden an den Deckwerken. Allerdings besteht in den Fällen, wo sich in unmittelbarer Nähe des Ufers Bauwerke wie z.B. Brückenwiderlager befinden, durchaus die Möglichkeit, dass durch eine Schiffsanfahrung die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks gefährdet wird. Auf Grundlage des Impulssatzes und des Drallsatzes wurde von Meier-Dörnberg (1983) ein Formelapparat zur Prognose der Stoßbelastung und des Bremsweges bei einer Schiffsanfahrung hergeleitet, der von einer starren Böschung ausgeht. Wie Schadensfälle zeigen, dringen aber Schiffe bei den üblicherweise mit Deckwerken aus Schüttsteinen gesicherten Böschungen von Wasserstraßen immer in die Böschungen ein. Es wird ein Prognosemodell vorgestellt, das unter Anwendung des Energieerhaltungssatzes zusätzlich auch den Einfluss des Bodenwiderstands beim Eindringen des Bugs in die Böschung berücksichtigt. Ziel der in der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchgeführten Modell- und Naturversuche war es, das Verhalten des Bodens und des Schiffs bei einer Schiffsanfahrung zu untersuchen und die Eignung der beiden Prognosemodelle zu überprüfen. Damit wird die Voraussetzung zu einer realistischen Bewertung der Sicherheit baulicher Anlagen neben Bundeswasserstraßen geschaffen.

2. Theoretische Modellierung einer Schiffsanfahrung

Bei der Berechnung der Starrkörperverschiebungen des Schiffs und der auf den Boden wirkenden Kontaktkräfte kann auf zwei Wegen vorgegangen werden:

- Durch Aufstellen der Bewegungsgleichung lassen sich für das Schiff unter Berücksichtigung der Trägheitskräfte die zeitabhängigen Verschiebungen $x(t)$ und $z(t)$, die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sowie die Kontaktkraft $F(t)$ zwischen Böschung und Schiffsbug berechnen.
- Auf der Grundlage des Energieerhaltungssatzes der Mechanik können die Komponenten des Bremswe-

ges $s_{x,\max}$ und $s_{z,\max}$ des Schiffes berechnet werden. Die Betrachtung erfolgt hier unter quasistatischen Randbedingungen.

2.1 Rechenverfahren nach Meier-Dörnberg

Die Schiffsanfahrungen an Uferböschungen kann als ein Reibungsstoß angesehen werden, für das MEIER-DÖRNBERG (1983) eine geschlossene analytische Lösung für den Fall entwickelt hat, dass die Böschung starr ist. Bei einer solchen Anfahrung gleitet der Bug des Schiffes die Böschung hinauf und bei schräger Anfahrung auch wieder hinunter.

In dem Rechenverfahren wird die vollständige räumliche Bewegung des Schiffes beim Aufschieben erfasst, das sind die Translationsbewegungen des Schwerpunktes $x(t)$, $y(t)$ und $z(t)$ sowie die Drehungen um die Längsachse (Kippen), um die Hochachse (Änderung der Fahrtrichtung) und um die Querachse (Aufschieben) $\varphi_y(t)$. Wesentliche Vereinfachungen des Rechenansatzes liegen in der Geometrie des Schiffsbugs (gerade Bugkanten) und der eben und starr angenommenen Böschungsoberfläche. Weiter wird davon ausgegangen, dass auch das Schiff und die Ladung starr sind und dass Deformationen des Schiffes nur an der Stoßstelle berücksichtigt werden. Der gesamte Auffahrtvorgang wird in zwei Phasen getrennt:

- Die erste Phase umfasst den Stoßvorgang, durch den die Bugspitze in die anschließende Gleitbewegung umgelenkt wird. Unter der Annahme eines starr-plastischen (Kontakt zwischen Schiff und Böschung bleibt während des ganzen Auffahrtvorgangs erhalten) und reibungsbehafteten Stoßes werden die neuen Geschwindigkeitskomponenten nach dem Stoß bestimmt. Für die Coulomb'sche Reibungskraft am Kontaktpunkt zwischen Schiff und Böschung und die Relativgeschwindigkeit wird die gleiche Wirkungslinie angenommen.
- Die zweite Phase entspricht dem anschließenden Aufschieb- und Umlenkvorgang bis zum Stillstand bzw. der Bewegungsumkehr. Die Anfangsbedingungen für die Geschwindigkeiten der Aufschiebbewegung sind die errechneten Endgeschwindigkeiten der ersten Phase. Die sich bei der Aufschiebbewegung verändernden Werte für den Tiefgang, die Auftriebskraft und die Auftriebsmomente des Schiffes werden in den Bewegungsgleichungen berücksichtigt.

Für eine senkrechte Anfahrung eines Schiffes mit der Masse m und der Geschwindigkeit v_a an eine Böschung mit einer Neigung α ergeben sich bei einem Reibungsbeiwert zwischen Bug und Böschung von $\tan \delta$ die Komponenten des Bremsweges des Schwerpunktes x_{\max} und z_{\max} aus der Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung für $z(t)$ bzw. $x(t)$ zu:

$$z_{\max} = \frac{v_a}{\omega} \cdot \left(\frac{\cot \alpha - \tan \delta}{\left(1 + \frac{\tan \delta}{\tan \alpha}\right) + a_j \left(\frac{1}{\tan^2 \alpha} - \frac{\tan \delta}{\tan \alpha}\right)} \right)$$

mit

$$a_j = 1 + \frac{a^2}{i_v^2}$$

wobei a_x dem Abstand des Kontaktpunktes zwischen Bug und Böschung vom Schwerpunkt und i_y dem Trägheitsradius um die y-Achse und

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{h_0} \left(1 - \left(\frac{(\cot \alpha - \tan \delta) \cdot \cot \alpha \cdot a_j}{\left(1 + \frac{\tan \delta}{\tan \alpha} \right) + a_j \left(\frac{1}{\tan^2 \alpha} - \frac{\tan \delta}{\tan \alpha} \right)} \right)} \right)}$$

entspricht. Dabei ist g die Erdbeschleunigung und h_0 der Tiefgang. Die maximale vertikale Anhebung des angenommenen Kontaktpunktes errechnet sich mit

$$s_{z,\max} = z_{\max} \cdot a_j$$

Die maximale am Ende des Aufschiebvorgangs auftretende horizontale Kraft beträgt:

$$F_{x,\max} = \frac{g}{h_0} \cdot \frac{m \cdot a_j \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \delta)}{(\sin \alpha \cdot \tan \delta + a_j \cos \alpha)} \cdot z_{\max}$$

2.2 Modellierung mit dem Energieerhaltungssatz

Eine Möglichkeit zur Beschreibung einer Schiffsanfahrung an eine Böschung auch unter Berücksichtigung des Bodenwiderstandes bietet der Energieerhaltungssatz. Bei diesem Ansatz geht man davon aus, dass die kinetische Energie E_{kin} des anfahrens Schiffs in

- Reibungsarbeit E_R zwischen Boden und Schiffsbug,
- potentielle Energie E_{pot} durch die Anhebung des Bugs bei der Anfahrung,
- Verformungsarbeit E_{Ep} des Erdwiderstands des Bodens vor dem Bug beim Eindringen des Bugs in die Böschung und
- Verformungsarbeit E_{Bug} durch das Knautschen des Schiffsbugs

umgewandelt wird:

$$E_{\text{kin}} = E_R + E_{\text{pot}} + E_{\text{Ep}} + E_{\text{Bug}}$$

Dieser Ansatz hat damit gegenüber dem Ansatz von MEIER-DÖRNBERG den Vorteil, dass die Arbeit durch den Widerstand des Bodens vor dem Bug berücksichtigt werden kann. Wie im Folgenden gezeigt wird, sind die drei Energieanteile E_R , E_{pot} , und E_{Ep} abhängig vom Bremsweg s_{\max} .

2.2.1 Ermittlung der vertikalen Komponente der Kontaktkraft zwischen Bug und Böschung

Ausgangsgröße für die Ermittlung der Reibungsarbeit und der potenziellen Energie ist die Kontaktkraft zwischen Schiffsbug und Böschung. Sie lässt sich aus dem Gleichgewicht der vertikalen Kräfte am Schiff bestimmen. Beim Auffahren des Bugs taucht ein zusätzliches Volumen ΔV_{Bug} aus dem Wasser auf, während sich gleichzeitig das Heck des Schiffs tiefer ins Wasser senkt und dabei ein zusätzliches Wasservolumen von ΔV_{Heck} verdrängt (Bild 1). Vereinfachend wird im Folgenden der Volumenanteil des Bugs luftseitig vor dem Kontaktpunkt vernachlässigt und der Schiffskörper als ein Quader mit der Länge L und der Breite B angenommen.

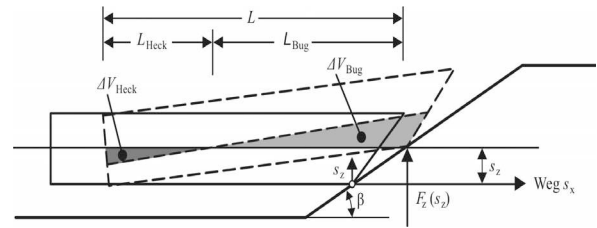


Bild 1: Geometrische Zusammenhänge beim Aufschieben eines Pontonbuges

Mit der Wichte des Wassers γ_W und der vertikalen Komponente $F_z(s_z)$ der Kontaktkraft des Bugs ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung der vertikalen Kräfte:

$$\Delta V_{\text{Heck}} \cdot \gamma_W + F_z(s_z) = \Delta V_{\text{Bug}} \cdot \gamma_W \quad (1)$$

Aus Summe der Momente um den Kontaktpunkt am Bug ergibt sich:

$$\Delta V_{\text{Heck}} \cdot \gamma_W \cdot (L_{\text{Bug}} + 2/3 \cdot L_{\text{Heck}}) = \Delta V_{\text{Bug}} \cdot \gamma_W \cdot 1/3 \cdot L_{\text{Bug}}$$

$$\Delta V_{\text{Heck}} / \Delta V_{\text{Bug}} = 1/3 \cdot L_{\text{Bug}} / (L_{\text{Bug}} + 2/3 \cdot L_{\text{Heck}}) \quad (2)$$

Außerdem gilt unter der vereinfachenden Annahme eines quaderförmigen Schiffsrumpfs mit der Breite B :

$$L_{\text{Bug}} + L_{\text{Heck}} = L \quad (3)$$

$$\Delta V_{\text{Bug}} = 0,5 \cdot s_z \cdot L_{\text{Bug}} \cdot B \quad (4)$$

$$\Delta V_{\text{Heck}} = 0,5 \cdot (L_{\text{Heck}} / L_{\text{Bug}}) \cdot s_z \cdot L_{\text{Heck}} \cdot B \quad (5)$$

Damit stehen 5 Gleichungen für die 5 Unbekannten ΔV_{Heck} , $F_z(s_z)$, ΔV_{Bug} , L_{Bug} und L_{Heck} zur Ermittlung zur Verfügung. Nach entsprechenden Umformungen ergibt sich daraus $F_z(s_z)$ zu:

$$F_z(s_z) = s_z \cdot B \cdot \gamma_W \cdot L/4 \quad (6)$$

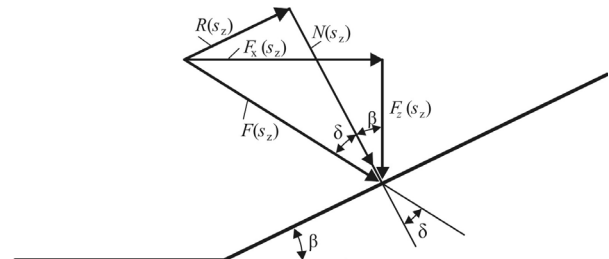


Bild 2: Annahmen und geometrische Beziehung für die Kontaktkraft F und ihre Komponenten

Unter der Annahme, dass beim Aufschieben zwischen Schiffsbug und Böschung ein Reibungsbeiwert zwischen Stahl und Boden von $\tan \delta$ wirkt und der Auffahrweg durch eine unter dem Winkel β zur Horizontalen geneigte Gerade beschrieben werden kann (siehe Bild 2), ist die Kontaktkraft gegen die Böschungsnormale um δ geneigt. Damit ergibt sich die vom Bug auf eine Böschung ausgeübte Kontaktkraft F zu:

$$F = F_z(s_z) / \cos(\beta + \delta) \quad (7)$$

und die Reibungskraft R zu:

$$R = F \cdot \sin \delta = F_z(s_z) \cdot \sin \delta / \cos(\beta + \delta) \quad (8)$$

Man erkennt, dass - wegen des Anstiegs der Kontaktkraft - die Reibungskraft mit dem Bremsweg s_x zunimmt, das Schiff beim Auffahren auf die Böschung also zunehmend abgebremst wird.

2.2.2 Kinetische Energie

Die kinetische Energie E_k lässt sich aus der Masse m des Schiffs und der Anfahrtschwindigkeit v_a bestimmen zu:

$$E_{kin} = m \cdot v_a^2 / 2$$

Weil ein Schiff bei der Anfahrt Wasser „mitzieht“, wird bei der kinetischen Energie des Schiffs zusätzlich eine hydrodynamische Wassermasse von 10 % bis 20 % der Schiffsmasse angesetzt.

2.2.3 Potentielle Energie

Die potentielle Energie E_{pot} am Endpunkt der Schiffsanfahrt ist das Integral über die lotrechte Komponente $V(s_z)$ der Kontaktkraft von $s_z = 0$ bis zur maximalen Anhebung $s_z = s_{z,max}$, bei der das Schiff zum Stehen kommt. Mit (6) ergibt sich:

$$E_{pot} = \int_{s_z=0}^{s_{z,max}} \gamma_w \cdot L / 4 \cdot B \cdot s_z \cdot dz$$

$$E_{pot} = \gamma_w \cdot L / 8 \cdot B \cdot s_{z,max}^2 \quad \text{mit } s_z = s_x \cdot \tan \beta \text{ ist:}$$

$$E_{pot} = \gamma_w \cdot L / 8 \cdot B \cdot \tan^2 \beta \cdot s_{x,max}^2 \quad (9)$$

Wie man sieht, nimmt die potentielle Energie E_{pot} quadratisch mit der Anhebung s_z des Bugs bzw. mit dem Bremsweg $s_{x,max}$ zu.

2.2.4 Reibungsarbeit der Kontaktkraft

Mit (6) und (8) errechnet sich die Reibungskraft in Abhängigkeit von der Anhebung s_z des Bugs zu:

$$R = s_z \cdot B \cdot \gamma_w \cdot L / 4 \cdot \sin \delta / \cos (\beta + \delta)$$

und mit $s_z = s \cdot \sin \beta$ ergibt sich die Reibungskraft als Funktion des Weges s zu:

$$R = s \cdot \sin \beta \cdot B \cdot \gamma_w \cdot L / 4 \cdot \sin \delta / \cos (\beta + \delta) \quad (10)$$

Die bis zum Stillstand des Schiffs geleistete Reibungsarbeit E_R ist dann das Integral über die Reibungskraft R entlang des Weges von $s = 0$ bis $s = s_{max}$:

$$E_R = \frac{\sin \beta \cdot \sin \delta}{4 \cdot \cos (\beta + \delta)} \cdot B \cdot \gamma_w \cdot L \int_0^{s_{max}} s \cdot ds$$

$$E_R = \frac{\sin \beta \cdot \sin \delta}{8 \cdot \cos (\beta + \delta)} \cdot B \cdot \gamma_w \cdot L \cdot s_{max}^2$$

Mit $s_{max} = s_{x,max} / \cos \beta$ ist die Reibungsarbeit in Abhängigkeit der horizontalen Komponente des Bremsweges $s_{x,max}$:

$$E_R = \frac{\tan \beta \cdot \sin \delta}{8 \cdot \cos (\beta + \delta) \cdot \cos^2 \beta} \cdot B \cdot \gamma_w \cdot L \cdot s_{x,max}^2 \quad (11)$$

Man erkennt, dass auch die Reibungsenergie E_R quadratisch mit dem Bremsweg zunimmt.

2.2.5 Arbeit des Erdwiderstands vor dem Bug des Schiffs

Ähnlich wie bei CALGARO (1991) und DENVER (1983) wird der Eindringwiderstand, den die Böschung dem eindringenden Schiff entgegen setzt, durch den Erdwiderstand, d.h. den passiven Erddruck modelliert. Ge-

schlossene Lösungen zur Ermittlung des Erdwiderstands vor Druckflächen existieren nur für gerade Flächen. In der Regel sind die Bugflächen von Spitzbugschiffen gekrümmt. Zur Ermittlung des Erdwiderstands vor einem in die Böschung eindringenden Bug muss daher die Buggeometrie durch gerade Flächen angenähert werden. Für einen mit nur zwei geraden Flächen vereinfachten Bug zeigt Bild 3 die Geometrie der sich ergebenden Bruchkörper des Erdwiderstands bei einer senkrechten Anfahrt eines Schiffes in eine Böschung.

Bei der Ermittlung der Arbeit des Erdwiderstands wird vereinfacht die Seitenreibung R_0 der Bruchkörper der Erdwiderstandskeile vernachlässigt und nur die horizontale Komponente E_{ph} des Erdwiderstands und die durch ihn bei der Eindringung mobilisierte Reibung R_s am Schiffsrumpf berücksichtigt.

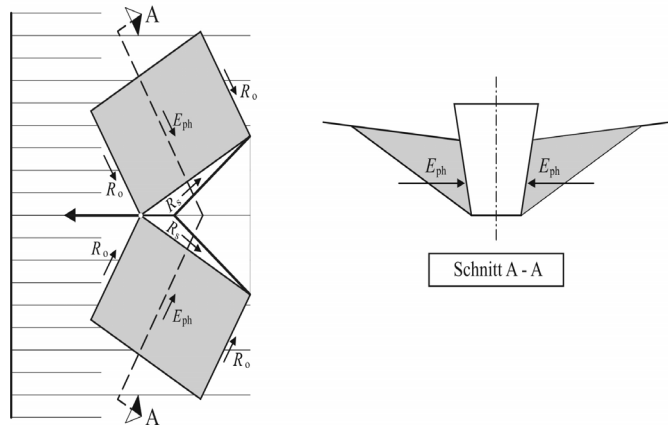


Bild 3: Bruchkörper des Erdwiderstands E_{ph} am Bug bei einer senkrechten Anfahrt und horizontalem Eindringen eines Schiffs in eine Böschung

Im Gegensatz zur lotrechten Komponente der Kontaktkraft zwischen Schiff und Böschung ist der Erdwiderstand vor dem Bug keine lineare Funktion des Eindringweges des Schiffs in die Böschung. Zur Berechnung der Arbeit des Erdwiderstands geht man davon aus, dass das Schiff „schrittweise“ in die Böschung eindringt (Bild 4). Für jeden Schritt werden dann die Komponenten E_{ph} und R_s des Erdwiderstands und die durch die beiden Komponenten geleistete Arbeit E_{Ep} ermittelt. Dabei wird berücksichtigt, dass sich der Erdwiderstand schräg zur Böschungsneigung ausbildet, das Gelände also mit einem Winkel ansteigt, der kleiner als der Böschungswinkel α ist.

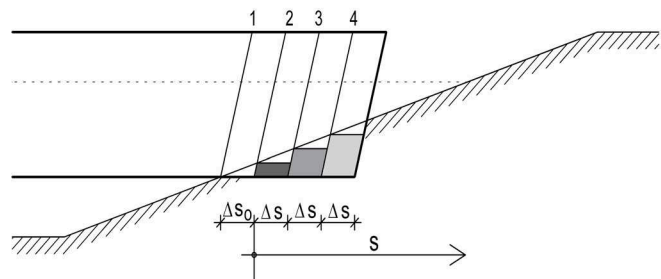


Bild 4: „Schrittweises“ horizontales Einfahren des Schiffsbugs in die Böschung zur Ermittlung der Arbeit des Erdwiderstands

Bei der Beschreibung des Auffahrvorgangs durch MEIER-DÖRNBERG (1983) wurde die Böschung als starr angenommen. Unter diesen Voraussetzungen entspricht bei einer senkrechten Böschungsanfahrt die Neigung β der Bahnkurve des Kontaktpunktes dem Neigungswinkel α der Böschung: $\beta = \alpha$. Wenn der Bug in die Böschung eindringt, ist $0 \leq \beta < \alpha$, dabei ist die Neigung β der Bahnkurve des Kontaktpunktes unbekannt. Es steht auch keine weitere Bestimmungsgleichung für β zur Verfügung. Da sich bei einer Anfahrt allerdings eine Bahnkurve einstellen wird, bei der der Widerstand des Bodens ein Minimum ist, kann β und damit auch der Bremsweg ermittelt werden, indem β variiert wird: maßgebend ist die Neigung β der Bahnkurve, die den größten Bremsweg ergibt.

2.2.6 Bremsweg

Eine nicht immer auf der sicheren Seite liegende erste schnelle und einfache Abschätzung des Bremswegs ist möglich, wenn man das Ufer und den Schiffsbug als starr annimmt. In diesem Fall wird die Verformungsarbeit durch das Knautschen des Schiffsbugs und den Erdwiderstand vor dem Schiffsbug vernachlässigt und die Neigung β der Bahnkurve des Kontaktpunktes ist bei senkrechter Anfahrt gleich der Böschungsneigung α . Die kinetische Energie wird damit in potentielle Energie und Reibungsarbeit der Kontaktkraft zwischen Schiffsbug und Böschung umgewandelt:

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{pot}} + E_R \quad (12)$$

Mit der kinetischen Energie:

$$E_{\text{kin}} = m \cdot v_a^2 / 2,$$

der potentiellen Energie (9) und der Reibungsenergie (11) ist mit (12) die horizontale Komponente $s_{x,\text{max}}$ des Bremsweges:

$$s_{x,\text{max}} = v_a \sqrt{\frac{4 \cdot m}{\gamma_w \cdot L \cdot B \cdot \tan \alpha \cdot (\tan \alpha + \sin \delta / ((\cos(\alpha + \delta) \cdot \cos^2 \alpha))}}$$

Wie man sieht, ergibt sich unter diesen Voraussetzungen eine geschlossene Lösung für den Bremsweg, der linear mit der Anfahrtsgeschwindigkeit des Schiffs zunimmt.

Bei einer Berücksichtigung der Arbeit des Erdwiderstands vor dem Bug löst man zur Ermittlung des Bremswegs $s_{x,\text{max}}$ die Gleichung des Energieerhaltungssatzes:

$$E_{\text{kin}} = E_R(s_{x,\text{max}}) + E_{\text{pot}}(s_{x,\text{max}}) + E_{\text{Ep}}(s_{x,\text{max}})$$

am besten iterativ, da - wie in 2.2.5 beschrieben - die Arbeit des Erdwiderstands durch „schrittweises“ Einfahren des Schiffsbugs in die Böschung ermittelt und darüber hinaus die maßgebende Neigung β der Bahnkurve des Kontaktpunktes in einer Variationsrechnung ermittelt werden muss.

In Fällen, bei denen es zu erheblichen Verformungen am Schiffsbug kommt, kann noch ein weiteres Glied für die Verformungsarbeit am Schiffsbug in die Gleichung aufgenommen werden. Für die dabei anzusetzende Kraft-Verformungs-Beziehung werden in der DIN 1055 Teil 9 erste Ansätze angegeben.

3. Versuche zum Schiffsstoß

3.1 Einleitung

Zur Absicherung der theoretischen Berechnungsverfahren und zur Untersuchung der bei Schiffsanfahrungen in Wasserstraßen hervorgerufenen tatsächlichen Stoßkräfte sowie der auftretenden Bruchvorgänge und Verformungen wurden bei der BAW zunächst kleinmaßstäbliche Modellversuche in trockenem Sand durchgeführt. Zur Absicherung der Ergebnisse aus den 15 Versuchen wurden in einem weiteren Schritt zusätzlich drei Naturversuche durchgeführt, um mögliche Maßstabs- und Einflüsse aus der Bewegung des Schiffes im Wasser zu erkennen sowie die Größe und den Einfluss eines Porenwasserdrucks im Boden während des Stoßvorganges zu untersuchen. Die Untersuchungen wurden auf die frontale Anfahrt von typischen Binnenschiffen mit großer Abladetiefe beschränkt. Sie wurden als starre Körper modelliert.

3.2 Modellversuche

3.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden in der Versuchsrunde der ehemaligen Außenstelle der BAW in Berlin durchgeführt. Die Konzipierung der Modellversuche erfolgte unter der Verwendung von Modellgesetzen. Mit deren Hilfe können die Messergebnisse interpretiert und die Ergebnisse von Verschiebungs- und Kraftmessungen bei Modellversuchen auf den großmaßstäblichen Prototyp übertragen werden. Der Modellierung der Böschungen (Bild 5) liegt ein im Bereich der Bundeswasserstraßen weit verbreitetes Querschnittsprofil mit einer 1:3 geneigten Böschung und einer Böschungshöhe von 5 m zugrunde. Der Einbau des trockenen Sandes mit einem Ungleichförmigkeitsgrad von $U \approx 2$ erfolgte mit Hilfe des Rieselffahrens. Die Lagerungsdichte lag zwischen $D = 0,7$ und $D = 0,8$. Die Böschungen wurden mit einer horizontalen Böschungskrone modelliert. Der Lasteintrag durch die Schiffsanfahrt erfolgte zur Gewährleistung symmetrischer Verhältnisse in der Mitte der Versuchsrunde.

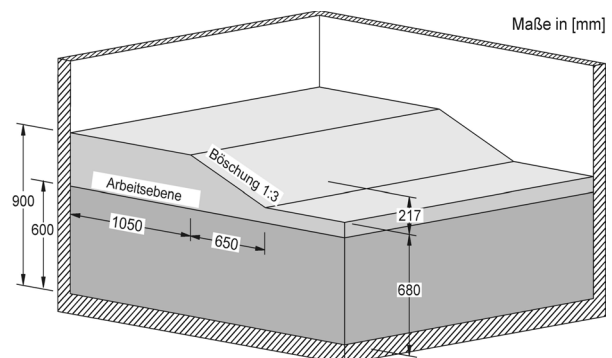


Bild 5: Perspektivische Darstellung der Modellböschung in der Versuchsrunde

Für die Modellversuche wurden je ein Typschiff der beiden im Binnenschiffbau vertretenen Bugformen „Spitzbugschiff“ und „Pontonbugschiff“ ausgewählt (Bild 6). Als Pontonbugschiff wurde der Europaleichter II a verwendet. Der Europaleichter besitzt eine Breite von 11,40 m und eine Länge über alles von 76,50 m. Die Modellversuche wurden für einen Tiefgang von 2,5 m durchgeführt, bei dem das Schiff eine Tragfähigkeit von 1940 t hat. Das Spitzbugschiff *Johann Welker*

hat bei einer Breite von 9,46 m und einer Länge über alles von 80,00 m bei einem Tiefgang von 2,50 m eine Tragfähigkeit von 1611 t.

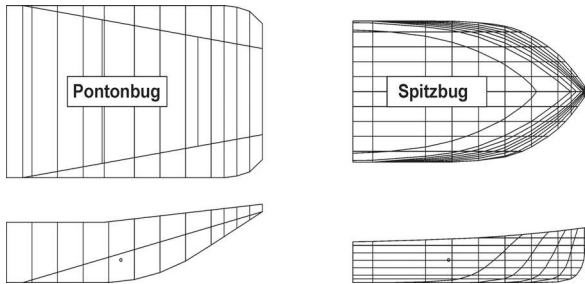


Bild 6: Pontonbug des Europaleichters II a und Spitzbug des Johann Welker

Im Modell wurden die Schiffe in ihrer Längsabmessung u.a. aus Platzgründen in der engen Versuchsrinne nur bis zum Schwerpunkt abgebildet. Der Bug dieser Prototypen wurde aber in der äußeren Form exakt nachgebaut (Bild 7).

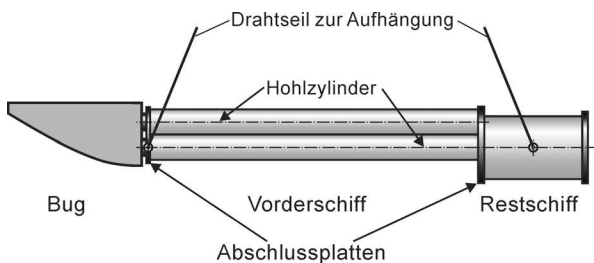


Bild 7: Modell des Pontonbuchs

Die Anfahrt wurde als dynamischer Vorgang ausgeführt, bei dem die auftretenden Trägheitskräfte am Schiff und im Boden gemessen werden konnten. Zur Durchführung der Versuche wurden die Schiffmodelle mit zwei Drahtseilen als Pendel aufgehängt. Am Bug des Modells enthielt die Aufhängung Federn, die so dimensioniert waren, dass sich beim Auffahrtvorgang und der Anhebung des Bugs genau die Kontaktkraft einstellt wie bei der Anfahrt eines unter Auftrieb stehenden Schiffes. Um einen Schiffsstoß zu erzeugen wurde das am Pendel hängende Schiffmodell so weit ausgelenkt, dass sich bei der Rückschwingung in die Modellböschung die versuchstechnisch gewünschte Anfahrtsgeschwindigkeit des Schiffs ergab. Während des Stoßvorgangs wurden der Weg, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung des Schiffs sowie die Kraft gemessen. Im Boden wurden die Drücke und Beschleunigungen aufgenommen.

Die Tabelle 1 enthält eine Zusammenstellung der durchgeführten Versuche und Versuchsparameter. Darüber hinaus wurden noch weitere Modellversuche mit anderen Randbedingungen durchgeführt, über die hier nicht weiter berichtet wird.

Versuchstyp (Anzahl der Versuche)	Modellmaßstab	Versuchsparameter
Modellversuche „Pontonbug“ (9)	1:23	Anfahrtsgeschwindigkeiten: $v_a = 0 - 1,16$ m/s, Böschungsneigungen: 1:1, 1:2, 1:3, Masse: $m = 191$ kg
Modellversuche „Spitzbug“ (5)	1:23 1:17,8	Anfahrtsgeschwindigkeiten: $v_a = 0 - 1,16$ m/s, Böschungsneigung: 1:3, Masse: $m = 191$ kg

Tabelle 1: Modellversuche und Versuchsparameter

3.2.2 Ausgewählte Versuchsergebnisse

Aus den gemessenen Verschiebungen in x- und z-Richtung lassen sich Bahnkurven für ausgewählte Punkte des Starrkörpers Schiff darstellen. Die Bahnkurve des ersten Kontaktpunktes zwischen Bug und Böschung ist für einen typischen Versuch mit einem Pontonbug und für einen Spitzbug im Bild 8 dargestellt. Die Bahnkurven der beiden Bugtypen zeigen charakteristische Unterschiede. Der Spitzbug schneidet zunächst etwa 7 cm tief horizontal in die Böschung. Dann hebt die vertikale Komponente des Bodenwiderstandes den Spitzbug an, so dass er auf einer Bahnkurve mit einer deutlich kleineren Neigung als der Böschungsneigung weiter in die Böschung eindringt. Der Pontonbug dagegen dringt in der ersten Phase wegen seiner stumpfen Bugform nur 2 cm horizontal in die Böschung ein, um in der zweiten Phase annähernd böschungsparell die Böschung hinauf zu gleiten, bis er in der dritten Phase bei einer horizontalen Verschiebung von etwa 300 mm wieder deutlich in die Böschung eindringt.

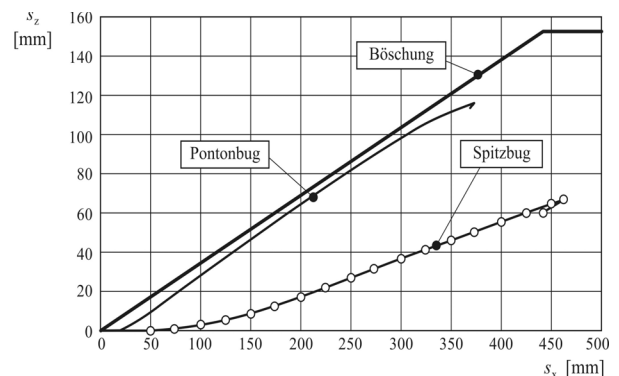


Bild 8: Bahnkurve des ersten Kontaktpunktes zwischen Böschung und Schiff bei einem Pontonbug und bei einem Spitzbug

Der Verlauf der horizontalen Komponente F_x der Kontaktkraft zwischen Schiffsbug und Böschung in Abhängigkeit von der horizontalen Verschiebung s_x des Kontaktpunktes ist im Bild 9 dargestellt. Auch der Verlauf der Stoßkraft ist bei den beiden Bugformen deutlich unterschiedlich. Wegen der großen Breite des Pontonbuges kann sich bei einer senkrechten Anfahrt vor dem Pontonbug schon bei einem sehr kleinen Weg ein großer Widerstand der Böschung entwickeln, der zu einer ausgeprägten Kraftspitze gleich zu Beginn der Anfahrt führt. Der als Stoß wirkende Bodenwiderstand lenkt das Schiff um, so dass der Bug in der zweiten Phase nicht weiter in die Böschung eindringt, sondern annähernd böschungsparell die Böschung hinauf gleitet. Dabei steigt die Kontaktkraft weiter an. Wenn das Schiff weit genug die Böschung hinauf gleitet, kann es in einer dritten Phase wegen des Anstiegs der Kontaktkraft zu einem erneuten Versagen des Bodens kommen, bei dem der Bug wieder in die Böschung

eindringt. Im Vergleich zum Pontonbug nimmt bei einem Spitzbug die Kontaktkraft mehr oder minder kontinuierlich bis zum Stillstand des Schiffs zu. Der Spitzbug schneidet in die Böschung ein und es bildet sich an den beiden Seiten des Bugs ein mit dem Eindringen größer werdender Erdwiderstand, so dass die Kontaktkraft kontinuierlich zunimmt. Dabei sind die zwei Phasen der Bahnkurve des Spitzbuges (Bild 9) auch im Kraftverlauf deutlich zu erkennen: in der ersten Phase der horizontalen Eindringung des Bugs bis zu etwa 70 mm ist die Kraft-Verschiebungskurve deutlich steiler als in der zweiten Phase, bei der die Bahnkurve dann ansteigt.

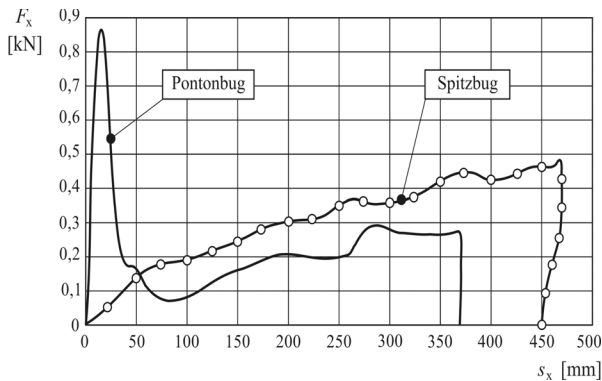


Bild 9: Horizontale Komponente der Kontaktkraft in Abhängigkeit von der horizontalen Verschiebung beim Pontonbug und beim Spitzbug

3.2.3 Vergleich von Versuch und theoretischer Prognose beim Pontonbug

Die Modellversuche mit dem Pontonbug für die 1:3 geneigte Böschung haben gezeigt, dass die Größe des Bremsweges im Wesentlichen durch die zweite Phase bestimmt wird, in der der Bug böschungsparell die Böschung hinauf gleitet. Es liegt daher nahe, die bei einem Pontonbug im Versuch ermittelten Bremswege mit den Ergebnissen von theoretischen Modellen zu vergleichen, die eine starre Böschung annehmen ($\alpha = \beta$). Das ist das Verfahren nach MEIER-DÖRNBERG und der Energieerhaltungssatz. Bei beiden Modellen wird die geringe Eindringung des Bugs in die Böschung in der ersten Phase vernachlässigt. Bei den Prognosen wurde eine Böschung mit einer Neigung von $\alpha = 18,3^\circ$ (1:3) und ein Reibungsbeiwert zwischen Boden und Schiffskörper von $\tan \delta = 0,625$ ($\delta = 32^\circ$) angenommen, wie er sich bei Versuchen zwischen dem verwendeten Modellsand und dem Schiffskörper ergeben hatte.

In Bild 10 sind die maximalen horizontalen Verschiebungen, das sind die Bremswege $s_{x,max}$ in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit v_a dargestellt. Sowohl bei dem Verfahren nach MEIER-DÖRNBERG als auch bei Anwendung des Energieerhaltungssatzes ergibt sich eine lineare Abhängigkeit des Bremsweges von der Anfangsgeschwindigkeit. Die Darstellung zeigt, dass die nach MEIER-DÖRNBERG ermittelten Werte für die Verschiebungen etwas geringer sind als die Messergebnisse. Die Ermittlung des Bremsweges mit dem Energieerhaltungssatz ergibt größere Bremswege als nach MEIER-DÖRNBERG, weil der Energieverlust beim Stoß in der ersten Phase nicht berücksichtigt wird. Insgesamt ist eine gute Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentellen Bremswegen festzustellen.

In Bild 10 ist zusätzlich der sich nach MEIER-DÖRNBERG ergebende Bremsweg eingetragen, der dem derzeit für die Bundeswasserstraßen gültigen Gefahrenlichtraumprofil zu Grunde liegt. Hierbei wurde auf der sicheren Seite liegend ein kleinerer Reibungsbeiwert zwischen Schiff und Böschung von $\tan \delta = 0,40$ ($\delta = 21,8^\circ$) angenommen. Es ist zu erkennen, dass diese Verschiebungen größer als die gemessenen sind und man somit mit der Anwendung des Gefahrenlichtraumprofils für Böschungsneigungen $\leq 1:3$ auch für die nicht starre Böschung auf der sicheren Seite liegt.

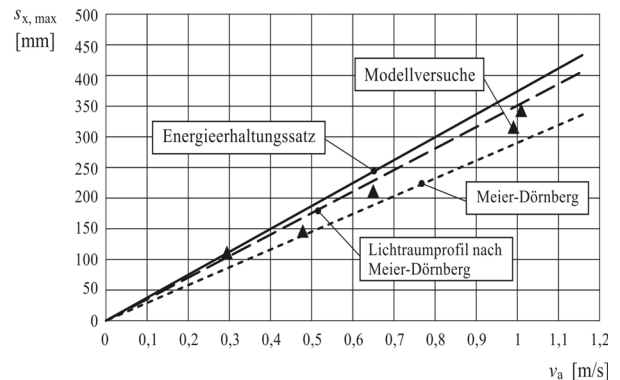


Bild 10: Bremsweg $s_{x,max}$ in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit v_a bei Modellversuchen m. d. Pontonbugschiff

Ein Vergleich der maximalen horizontalen Kontaktkräfte, die das Schiff am Ende des Anfahrvorganges auf die Böschung ausübt, ist in Bild 11 dargestellt. Die Prognosen nach MEIER-DÖRNBERG und nach dem Energieerhaltungssatz ergeben für eine starre Böschung einen linearen Zusammenhang zwischen der Kontaktkraft und der Anfangsgeschwindigkeit. Die Modellversuche zeigen im Gegensatz zu den theoretischen Prognosen einen unterlinearen Verlauf. Der Grund liegt darin, dass sich bei hohen Anfangsgeschwindigkeiten längere Bremswege und eine größere Anhebung und damit auch größere Kontaktkräfte ergeben. Diese können vom Boden nicht aufgenommen werden, so dass es zu einem Versagen des Bodens kommt. Die mittlere Bahnkurve des Schiffes wird im Vergleich zur Prognose mit einer starren Böschung flacher (Bild 8). Der Bug wird daher im Versuch immer weniger angehoben als bei einer Prognose, bei der eine starre Böschung angenommen wird. Damit ist auch die horizontale Komponente F_x der Kontaktkraft im Versuch kleiner als bei der Prognose.

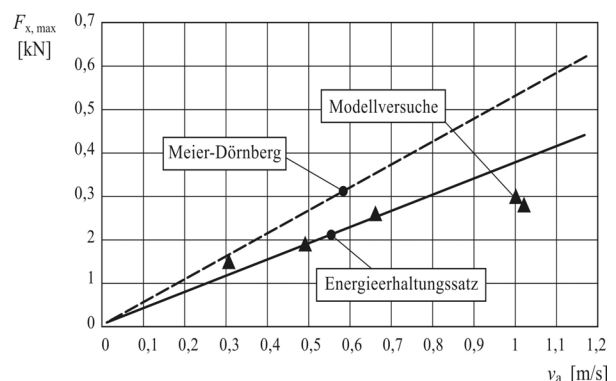


Bild 11: Horizontalkomponente $F_{x,max}$ der Kontaktkraft am Ende des Bremswegs in Abhängigkeit von der Anfangsgeschwindigkeit v_a bei einem Pontonschiff

3.3 Naturversuche

3.3.1 Versuchsaufbau

Zusätzlich zu den Modellversuchen wurden im April 1995 noch drei Naturversuche mit dem Leichter *Gerda* am Elbe-Havel-Kanal im Bereich des Abzweiges Niegripper Verbindungskanal durchgeführt. Dabei handelte es sich um drei senkrechte Anfahrungen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Abladetiefen. Das Schiff besitzt eine Länge von 67 m und eine Breite von 8 m. Die Masse des Schiffes beträgt bei einem Tiefgang des Schiffes von 1,9 m ca. 900 t und bei einem Tiefgang von 0,6 m ca. 160 t. Die Anfahrungen fanden in einer eigens für den Versuch hergestellten 12 m breiten Schüttung (Bild 12) aus Kiessand mit mittlerer Festigkeit statt, deren Böschung eine Neigung von 1:3 hatte. Der Freibord betrug etwa 1 m.



Bild 12: Versuchsböschung beim Naturversuch

Während des Stoßvorgangs wurden die Beschleunigungen am Schiff und die Wasserdrücke unter dem Schiffsbug sowie in der Böschung die Porenwasserdrücke, die Erddrücke und die Schwinggeschwindigkeiten gemessen.

3.3.2 Versuchsergebnisse

Für den Versuch 2 sind im Bild 13 die vertikale und horizontale Verschiebung des Kontaktpunktes und im Bild 14 die vertikale und horizontale Komponente der Kontaktkraft in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Auffahrung dauert etwa 2,4 s, dann haben die Verschiebungen des Kontaktpunktes Endwerte von $s_{x,max} = 3,83$ m in horizontaler Richtung und $s_{z,max} = 0,85$ m in vertikaler Richtung erreicht. Bemerkenswert sind zwei Unterschiede im Vergleich zu den Modellversuchen mit einem Spitzbug. Zum einen zeigt die vertikale Komponente der Kontaktkraft zu Beginn einen deutlichen Stoß, was wohl auf die sehr füllige Form des Buges von *Gerda* zurückzuführen ist. Weiterhin ist bemerkenswert, dass die Horizontalkomponente der Kontaktkraft nach etwa 1,5 s abnimmt, obwohl das Schiff anschließend noch weitere 0,3 m bis 0,4 m angehoben wird und deshalb aus statischen Gründen eigentlich ein weiterer Anstieg der Horizontalkomponente der Kontaktkraft zu erwarten wäre. Die Abnahme der Horizontalkraft ist vermutlich auf die Wirkung der Trägheitskraft aus der Vertikalbeschleunigung des Buges zurückzuführen.

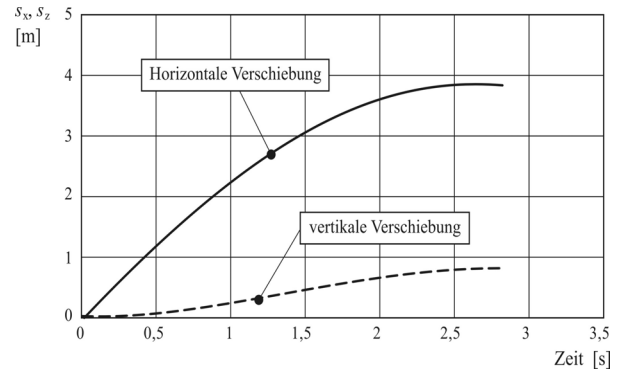


Bild 13: Vertikale und horizontale Verschiebung des Kontaktpunktes beim Naturversuch Nr. 2

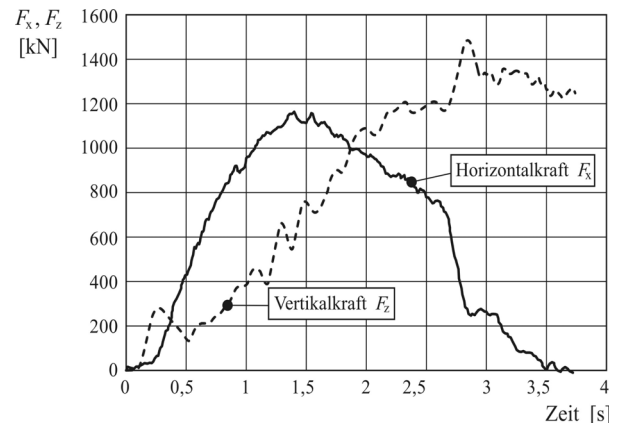


Bild 14: Vertikale und horizontale Komponente der Kontaktkraft beim Naturversuch Nr. 2

3.3.3 Vergleich des Naturversuchs (*Gerda*) mit theoretischen Prognosen

Für eine Prognose der Auffahrung musste die Geometrie des Schiffsbugs von *Gerda* vereinfacht werden. Die Rundung des Buges wurde durch zwei geneigte Flächen modelliert. An jeder dieser Flächen bildet sich ein Erdwiderstandskeil aus. Aufgrund von Sondierungen wurde für den Kiessand der Böschung ein Reibungswinkel von $\varphi' = 35^\circ$ und eine gemittelte Wichte (erdfeucht und unter Auftrieb) von $\gamma' = 14,6$ kN/m² angesetzt. Für die Reibung zwischen Kiessand und dem Stahl der Schiffshaut wurde ein Reibungswinkel von $\delta = 32^\circ$ angesetzt, der zuvor in speziellen Scherversuchen ermittelt worden war. Ein Porenwasserdruck unter dem Bug wurde nicht berücksichtigt. Die Prognose des Bremsweges benutzt den Energieerhaltungssatz, siehe Abschnitt 2.2.

Bei der Berechnung der kinetischen Energie des Schiffes wurde zusätzlich eine hydrodynamische Masse von 10 % der Masse des Schiffes angesetzt:

$$E_{kin} = 1,1 \cdot m_{Schiff} \cdot \frac{v^2}{2} = 1,1 \cdot 900 \cdot \frac{2,57^2}{2} = 3269 \text{ kNm}$$

Die mittlere Breite B und Länge L des quaderförmig angenommenen Schiffsrumpfs zur Bestimmung der vertikalen Kontaktkraft F_z mit Gleichung (6) wurde überschlägig aus der Masse des Schiff m_{Schiff} , dem Tiefgang von $h_0 = 1,90$ m und der Dichte des Wassers aus der Beziehung

$$m_{Schiff} = B \cdot L \cdot h_0 \cdot \rho_W$$

$$B \cdot L = \frac{m_{\text{Schiff}}}{h_0 \cdot \rho_w}$$

ermittelt.

Im Bild 15 ist die Deformationsarbeit E_{Ep} des Erdwiderstandes in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des Schiffes in die Böschung für den Fall dargestellt, dass die Bahnkurve des Kontaktpunktes zwischen Bug und Böschung horizontal ist, d.h. dass die gesamte kinetische Energie des Schiffes durch die Arbeit des Erdwiderstands E_{Ep} aufgezehrt wird. Einzelheiten der Berechnung der Arbeit des Erdwiderstands sind in SCHUPPENER ET.AL. (2005) dargestellt.

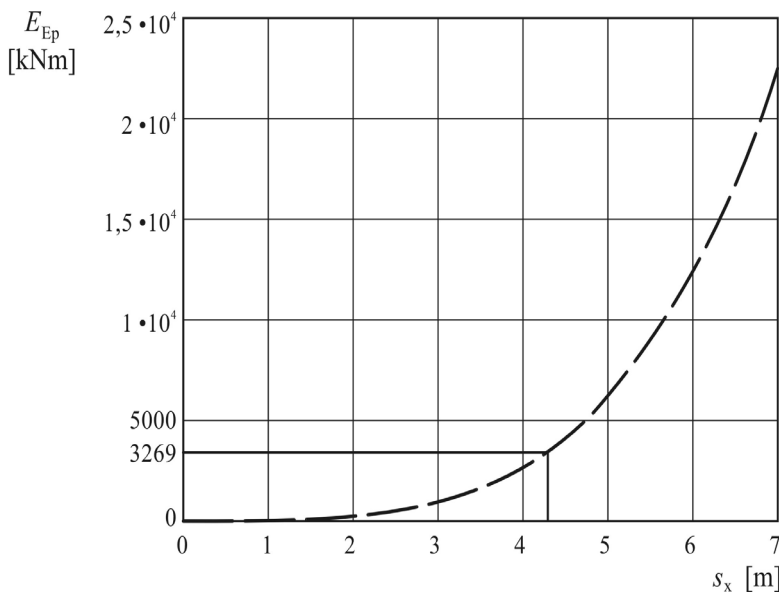


Bild 15: Deformationsarbeit bei horizontalem Bremsweg

Die Naturversuche mit der *Gerda* hatten gezeigt, dass der Bug nicht horizontal, sondern auf einer Bahnkurve mit einer mittleren Neigung von $12,4^\circ$ in die Böschung eingedrungen ist. In einer zweiten Berechnung wurde daher ein Bremsweg mit der beobachteten Neigung von $\beta = 12,4^\circ$ untersucht und bei der Energiebilanz neben der kinetischen Energie und der Arbeit des Erdwiderstands auch die potentielle Energie und die Reibungsarbeit der Kontaktkraft am Bug berücksichtigt. Unter diesen Annahmen verringert sich die Arbeit des Erdwiderstands auf $E_{Ep} = 495 \text{ kNm}$, d.h. auf weniger als 15 % der gesamten kinetischen Energie. Das macht deutlich, dass keine allzu große Genauigkeit bei der Modellierung der Buggeometrie für die Ermittlung des Erdwiderstands erforderlich ist. Des weiteren wurde der Bremsweg unter der Annahme ermittelt, dass die Böschung starr ist,

d.h. der Schiffsbug nicht in die Böschung eindringt, sondern auf der Böschungsoberkante hinauf gleitet ($\alpha = \beta$). Die Ergebnisse des Naturversuchs und der theoretischen Prognosen sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Wie die Zusammenstellung der Tabelle 2 zeigt, ist sowohl für die Kontaktkräfte als auch für die Bremswege insgesamt eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Prognosen und den Ergebnissen des Naturversuchs zu erkennen:

- Die Prognosen, bei denen die im Naturversuch beobachtete Neigung des Bremsweges von $\beta = 12,4^\circ$ angenommen wurde, ergeben 10 % bis 20 % größere Bremswege als im Versuch. Die Prognose liegt also auf der sicheren Seite.
- Die Prognosen, bei denen für die Neigung des Bremsweges die Böschungsneigung angenommen wird ($\alpha = \beta$), unterschätzen den Bremsweg und liegen daher auf der unsicheren Seite.
- Wie auch schon bei den Modellversuchen liefern die Prognosen mit dem Energieerhaltungssatz immer größere Bremswege als MEIER-DÖRNBERG. Das ist zumindest zum Teil darauf zurückzuführen, dass der Energieverlust des Umlenkstoßes zu Beginn der Anfahrt bei der Anwendung des Energieerhaltungssatz vernachlässigt wird.

Bei den Naturversuchen waren beim Auf-fahrtvorgang im Boden der Böschung Porenwasserüberdrücke gemessen worden. Allerdings wurde bei den Prognosen des Bremswegs angenommen, dass keine nennenswerten Porenwasserüberdrücke zwischen Bug und Böschung wirken und damit die Kontaktkraft voll reibungswirksam ist. Die Tatsache, dass der rechnerische Bremsweg bei Annahme voller Reibungswirksamkeit größer ist als im Naturversuch beobachtet wurden, deutet darauf hin,

		Max. Kontaktkraft [kN]		Bremsweg [m]	
		horizontal F_x	vertikal F_z	horizontal $s_{x,\max}$	vertikal $s_{z,\max}$
Ergebnisse des Naturversuchs:		1200	1200	3,83	0,85
Energieerhaltungssatz	Horizontaler Bremsweg: $\beta = 0^\circ$ (nur Erdwiderstand)	3000	0	4,27	0
	Geneigter Bremsweg wie im Naturversuch: $\beta = 12,4^\circ$ (mit Erdwiderstand)	1623	1220	4,63	1,03
	Geneigter Bremsweg wie im Naturversuch: $\beta = 12,4^\circ$ (ohne Erdwiderstand)	1276	1303	5,02	1,10
	Neigung des Bremswegs gleich Neigung der Böschung: $\alpha = \beta = 18,4^\circ$	1733	1434	3,63	1,21
MEIER-DÖRNBERG	Geneigter Bremsweg wie im Naturversuch: $\beta = 12,4^\circ$	1299	1326	4,2	0,93
	Neigung des Bremswegs gleich Neigung der Böschung: $\alpha = \beta = 18,4^\circ$	1610	1351	3,1	0,99

Tabelle 2: Vergleich des Bremswegs des Naturversuchs (*Gerda*) mit den Ergebnissen der theoretischen Prognosen

dass unmittelbar zwischen Bug und Böschung tatsächlich keine nennenswerten Porenwasserüberdrücke wirksam waren. Sonst hätten die gemessenen Bremswege größer sein müssen als die prognostizierten.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der Bremsweg eines Schiffes bei einer Anfahrt an die Böschung einer Wasserstraße und die dabei auftretenden Belastungen können theoretisch auf Grundlage des Impuls- und Drallsatzes für den vollplastischen Stoß nach MEIER-DÖRNBERG (1983) und auf Grundlage des Energieerhaltungssatzes ermittelt werden. Bei der Bundesanstalt für Wasserbau wurden in den vergangenen Jahren Modellversuche und Naturversuche durchgeführt, mit denen das Eindringen und Auffahren von Binnenschiffen mit typischen Bugformen untersucht wurden. Der Vergleich der beobachteten bodenmechanischen Bruchvorgänge, Bremswege und Kräfte mit den beiden Prognosemodellen ergibt eine zufriedenstellende Übereinstimmung, die es erlaubt, die Prognosemodelle auch bei anderen Randbedingungen von Schiffsanfahrten und auch bei Anfahrungen von Hochseeschiffen anzuwenden

So ist z.B. aus nautischen Gründen eine Schiffsanfahrt im Regelfall eine Schräganfahrt unter Winkeln von $\varepsilon < 30^\circ$. In diesem Fall setzt das Schiff seine Fahrt nicht geradlinig fort, sondern wird durch die seitlich angreifende Kontaktkraft wieder zum Wasser gedrückt. Daher beschreibt der Bug bei einer starren Böschung einen bogenförmigen Weg und rutscht nach einer maximalen Anhebung wieder von der Böschung herunter. Zur Untersuchung, ob der Schiffsbug ein Brückenwiderlager erreichen wird, kann der Bremsweg auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden, indem eine senkrechte Anfahrt angenommen und dabei für die Neigung β des Auffahrweges der Neigungswinkel angesetzt wird, der sich bei einem geradlinigen Auffahrweg unter einem Anfahrwinkel ε auf eine starre Böschung ergibt (Bild 16, links).

Um die bei einer Schräganfahrt aus geometrischen Gründen auch beim Pontonbug entstehende Eindringung des Bugs in die Böschung zu berücksichtigen, kann man annehmen, dass die Bugeindringung durch einen fortlaufenden Grundbruch entsteht, der durch die Kontaktkraft auf die Böschung hervorgerufen wird. Um eine Beziehung zwischen der Grundbruchlast und der Eindringung des Bugs formulieren zu können, wird angenommen, dass das Schiff zunächst auf der Bugkante aufliegt, neben der auf der einen Seite die

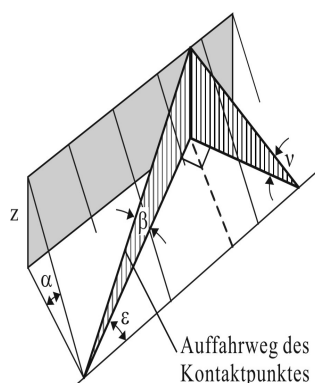
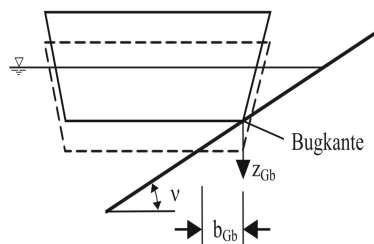


Bild 16: Geometrische Beziehungen bei der Schräganfahrt und der Eindringung in die Böschung



Schiffswand fast senkrecht ansteigt und auf der anderen Seite die etwa horizontale Fläche des Pontonbugs anschließt (siehe Bild 16, rechts). Unter diesen Bedingungen ergibt sich zwischen der lotrechten Eindringung z_{Gb} des Schiffsbugs, der Neigung der Böschung v quer zum Auffahrweg und der Breite b_{Gb} , mit der die Bugkante aufliegt, folgende Beziehung:

$$z_{Gb} = b_{Gb} \cdot \tan v \quad (14)$$

Es wird weiterhin angenommen, dass die Grundbruchlast der lotrechten Komponente der Kontaktkraft F_z entspricht, die gleichmäßig über die Länge verteilt wird, auf der die Bugkante auf der Böschung aufliegt. Die lotrechte Bodenpressung σ_{Gb} beim Grundbruch kann für eine unendlich lange Streifenlast in Abhängigkeit von den Bodenkennwerten und der Böschungsneigung v quer zum Auffahrweg als Funktion der Fundamentbreite b_{Gb} ermittelt werden. Die Kontaktkraft als Grundbruchlast ist dann:

$$F_z = \sigma_{Gb}(b_{Gb}) \cdot s_{x,max} \cdot b_{Gb} \quad (15)$$

Mit den Gleichungen (14) und (15) kann dann die lotrechte Komponente z_{Gb} der Bugeindringung iterativ errechnet werden. Da angenommen wird, dass der Bug in die Böschung eindringt, ist bei der Berechnung der Kontaktkraft F_z und des Bremsweges $s_{x,max}$ eine um einige Grad kleinere Neigung β des Auffahrweges (Bild 17) zu wählen als bei Annahme einer starren Böschung und dann zu überprüfen, ob die ermittelte lotrechte Eindringung des Schiffsbuges z_{Gb} der eingangs gewählten Neigung β des Auffahrweges entspricht. Ist die rechnerische Bugeindringung zu groß, dann wurde eine zu steile Neigung des Auffahrweges gewählt. Ist die rechnerische Bugeindringung kleiner als sich aus der angenommenen Neigung des Auffahrweges ergibt, dann war die angenommene Neigung des Auffahrweges zu klein (Bild 17).

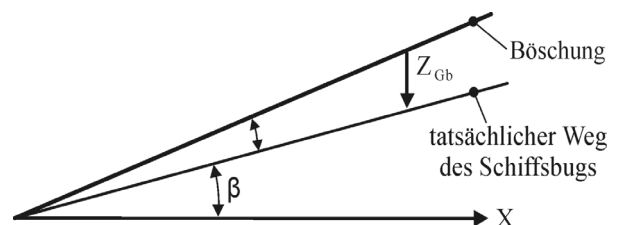


Bild 17: Böschung, lotrechte Eindringung des Schiffsbuges und tatsächlicher Weg des Schiffsbuges bei Eindringung in die Böschung

Der Vollständigkeit halber kann in diese Iteration auch noch die Verformungsarbeit durch den Grundbruch in der Böschung berücksichtigt werden, die sich zu

$$E_{Gb} = \frac{1}{2} \cdot N \cdot z_{Gb}$$

ergibt.

Literatur

CALGARO, J.A., Chocs de bateaux contre les piles de pont, Juin 1991, Ministre de l'équipement, du logement, des transports et de la mer

DENVER, H., Design of protective islands by means of geotechnical model tests, Geotechnical Report No. 12, Danish Geotechnical Institute, 1983

DIN 1055 TEIL 9 (2003-08) „Einwirkungen auf Tragwerke – Außergewöhnliche Einwirkungen“

MEIER DÖRNBERG, K. E., Schiffskollisionen, Sicherheitszonen und Lastannahmen für Bauwerke an Binnenwasserstraßen, Kurz-Veröffentlichung im VDI-Bericht Nr. 496, 1983.

SCHUPPENER, B., KAUTHER, R., KRAMER, H., VORBAU, J., Schiffsanfahrungen an Uferböschungen, 1. Hans Lorenz Symposium des Grundbauinstitutes der TU Berlin am 13. Oktober 2005

Verfasser

Dr.-Ing. Bernd Schuppener
Abteilung Geotechnik
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 3800
E-Mail: bernd.schuppener@baw.de

Dipl.-Ing. Regina Kauther
Referat Grundbau
Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kussmaulstrasse 17, 76187 Karlsruhe
Tel.: 0721 9726 – 2850
E-Mail: regina.kauther@baw.de

Prof. Dr.-Ing. Helmut Kramer
Ingenieurbüro für das Bauwesen VBI Kramer & Albrecht
Glockengießerwall 1, 20095 Hamburg
Tel.: 040 330039 – 0
E-Mail: Kramer@KramerAlbrecht.de

Dipl.-Ing. Jana Vorbau
Ingenieurbüro für das Bauwesen VBI Kramer & Albrecht
Glockengießerwall 1, 20095 Hamburg
Tel.: 040 330039 – 35
E-Mail: Vorbau@KramerAlbrecht.de